

Mit Quanteneffekten zu neuen Halbleiterbauelementen

Weimann, Günter

Veröffentlicht in:
Jahrbuch 2005 der Braunschweigischen
Wissenschaftlichen Gesellschaft, S.169-174



J. Cramer Verlag, Braunschweig

Mit Quanteneffekten zu neuen Halbleiterbauelementen*

PROF. DR. RER. NAT. GÜNTER WEIMANN

Fraunhofer-Institut für Angewandte Festkörperphysik
Tullastraße 72, D-79108 Freiburg i. Br.

Einleitung

Halbleiterbauelemente haben unsere Welt verändert, ohne Transistor und Laserdiode wäre die schier unbegrenzte und fast kostenlose Speicherung, Verarbeitung und Übertragung von Daten – und Information – undenkbar. Der Fortschritt in der Mikroelektronik lag für Jahrzehnte in der Skalierung: Immer kleinere Strukturen führten zu immer höheren Integrationsgraden, eröffneten aber auch neue Bauelementfunktionen. Heutige Strukturierungsverfahren, wie z. B. die Molekularstrahlepitaxie eignen sich für die Herstellung von Heterostrukturen – das sind Schichtfolgen aus unterschiedlichen Halbleitern – in Nanometerdimensionen, und damit in der Größenordnung der Materialwellenlänge der Elektronen. Die dabei auftretenden Quanteneffekte führen zu verbesserten Bauelementeigenschaften, so beim Elektronentransport in modulationsdotierten Feldeffekttransistoren oder bei den niedrigen Schwellenströmen von Quantenfilm- und Quantenpunktlasern. Während „konventionelle“ Halbleiterlaser und -detektoren mit Übergängen zwischen Leitungs- und Valenzband, also Interband-Übergängen arbeiten, sind die hier vorgestellten Bauelemente unipolar mit Übergängen zwischen Subbändern im Leitungsband. Sie eröffnen weite Spektralbereiche im Infraroten.

Neue Bauelemente: QWIPs und QCLs

Heterostrukturbauelemente auf der Basis der III-V-Verbindungshalbleiter sind allgegenwärtig, so z. B. der modulationsdotierte Feldeffekttransistor (MODFET) mit einer GaAs/AlGaAs-Heterostruktur oder der Potentialtopf- oder Quantenfilmlaser (QW-Laser). Der MODFET verdankt seine guten elektrischen Transporteigenschaften der räumlichen Trennung von Elektronen und Donatoratomen. Er ist heute der schnellste bekannte Transistor mit Grenzfrequenzen von über 300 GHz. Sein herausragendes Merkmal ist jedoch sein extrem niedriges Hochfrequenzrauschen, das den Satellitendirekttempfang mit kleinen Antennenschüsseln mit Durchmessern von 0,5 m ermöglicht und so diesem Bauelement

* Vortrag gehalten beim Kolloquium anlässlich der Jahresversammlung der Braunschweigischen Wissenschaftlichen Gesellschaft am 27. Mai 2005.

zum breiten Massenmarkt verholfen hat. Einen vergleichbaren Markt hat der QW-Laser in CD- und DVD-Spielern gefunden.

QW-Laser mit einem oder mehreren Potentialtöpfen (SQW oder MQW = single oder multiple quantum well) sind Bauelemente mit zweidimensionalen Elektronen- und Löchergasen, die sich nur in Quantenfilmebene bewegen können. Die zweidimensionale Zustandsdichte führt zu niedrigen Schwellenströmen und hohen Wirkungsgraden – beste Voraussetzung für zuverlässige und langlebige Bauelemente. Die Wellenlänge lässt sich durch Quantenfilmdicke und Potentialbarrieren einstellen.

In diesen Quanteneffekt-Bauelementen sind die Schichtdicken im Nanometerbereich, d. h. Bauelementdimensionen und Materiewellenlängen sind ähnlich, die Wellennatur bestimmt das Verhalten von Elektronen (und Löcher). In GaAs-Quantenfilmen zwischen AlGaAs-Potentialbarrieren bilden sich stehende Wellen aus, nur diskrete Wellenlängen sind erlaubt: Ganzzahlige Vielfache der halben Wellenlänge passen in die Potentialtöpfe, wir erhalten quantisierte Zustände und Subbänder. Sind die Potentialbarrieren dünn, können sie „durchtunnelt“ werden, periodische Halbleiterstrukturen können so Elektronenwellen entweder durchlassen oder reflektieren: Quantenphänomene führen zu neuen Funktionen und neuen Bauelementen.

Die elektronischen Übergänge zwischen den Subbändern können zur Emission und Absorption von Photonen genutzt werden, die Wellenlängen liegen im infraroten Spektralbereich und lassen sich durch Quantenfilmdicke, Barrierendicke und Barrierenhöhe in weiten Bereichen einstellen. Dieses „band structure engineering“ eröffnet zusätzliche Freiheitsgrade zum „materials engineering“ mit der Manipulation der Halbleiterzusammensetzung in ternären und quaternären Legierungen. Ein typischer Infrarotdetektor mit Quantenfilmen (QWIP = quantum well infrared photodetector) für das mittlere IR besteht so z. B. aus 20 Perioden mit 2,6 nm breiten $\text{In}_{0,3}\text{Ga}_{0,7}\text{As}$ -Potentialtöpfen und 24 nm breiten $\text{Al}_{0,3}\text{Ga}_{0,7}\text{As}$ -Barrieren. Die Detektion erfolgt durch die Anregung eines im Subband gebundenen Elektrons über die Potentialbarrieren in das Energiekontinuum, beim Anlegen eines elektrischen Feldes fließt ein Photostrom (Abb. 1a). Um ausreichende Absorption zu erhalten, werden die Potentialtöpfe kaskadiert, eine typische Struktur enthält 20 bis 50 Perioden. Die angeregten Elektronen tragen zum Photostrom bei bis zu ihrem Wiederempfang in einem Potentialtopf, wobei dieser Einfang statistisch geschieht, d. h. die Elektronen legen unterschiedliche Wegstrecken zurück. Dies führt zu Stromfluktuationen und damit zum Rauschen des Detektors. Durch Einbau einer zusätzlichen Nanometer-dicken Barriere am Ende einer jeden Periode wird der statistische Einfang deterministisch, jedes angeregte Elektron wird nach Durchlaufen einer, und nur einer, Periode der Struktur eingefangen, das Rauschen des Photostromes wird minimiert (Abb. 1b). Das Ergebnis ist eine extrem hohe thermische Auflösung unserer Wärmebildkameras mit Bestwerten von 5 mK [1].

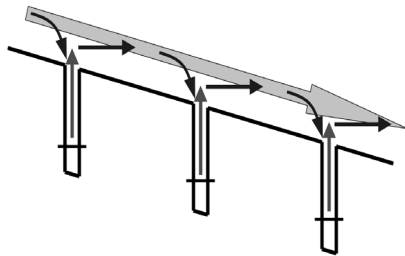


Abb. 1a: Leitungsband einer photoleitenden QWIP-Struktur mit statischem Elektroneneinfang.

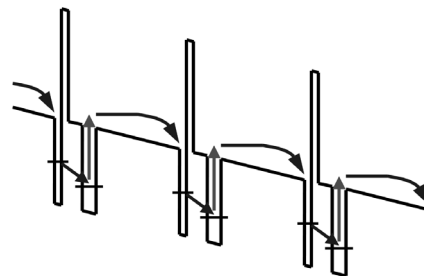


Abb. 1b: Deterministischer Elektroneneinfang durch zusätzlichen Potentialtopf mit Barriere.

Diese mit QWIPs arbeitenden Wärmebildgeräte wurden für die (militärische) Aufklärung entwickelt, die Betriebswellenlängen liegen – um große Reichweiten zu erzielen – in den atmosphärischen Fenstern bei $3 - 5 \mu\text{m}$ und $8 - 12 \mu\text{m}$. Für eine hohe räumliche Auflösung haben diese starrenden Detektoren, die ohne bewegliche Teile auskommen, Bildfeldmatrizen mit hoher Pixelzahl von z. B. 640×512 , die Dimension der einzelnen Pixel beträgt $20 \mu\text{m}$. Der technologische Entwicklungsstand der QWIPs ist hoch, mehr als 99,9 % der Pixel dieser hochintegrierten Bildfeldmatrizen sind voll funktionsfähig, weniger als 1 % der Bildpunkte sind defekt, wobei diese Defekte dann bei der Bildverarbeitung herausgerechnet werden.

Neue Entwicklungen gehen zu multispektralen Detektoren mit z. B. zwei Detektionswellenlängen. Die einzelnen Wellenlängen liegen entweder im gleichen Fenster, z. B. bei $3,5$ und $5 \mu\text{m}$ im mittleren IR, oder in den getrennten atmosphärischen Fenstern. Diese Zwei-Farben-Detektoren bzw. Zwei-Bänder-Detektoren werden durch Stapeln der Einzeldetektoren realisiert, die aktive Struktur wird dann bis zu $5 \mu\text{m}$ dick und besteht oft aus 100 Einzelschichten.

Die punkt- und zeitgleiche Detektion bei zwei Wellenlängen dient vor allem der Enttarnung, da der bispektrale Detektor gleichzeitig Temperatur und Emissivität der betrachteten Szene messen kann. Übliche Tarnungen bestehen in der Reduktion der Emissivität, die herabgesetzte Emissivität getarnter Objekte ist jetzt auffällig, sie können somit ausgemacht werden.

Unsere hier vorgestellten IR-Detektoren finden aber auch in vielen nicht-militärischen Bereichen Anwendung, so z. B. in der Umwelt- und Klimaüberwachung, in der Materialprüfung oder in der Medizin. Eine Anwendung aus dem letzten Bereich ist die differentielle IR-Thermografie, die zeitliche Änderungen der Thermoregulation des menschlichen Körpers registriert. Temperaturregulationen beim Menschen erfolgen im Hz- und Sub-Hz-Bereich, so bei $0,1 \text{ Hz}$ für die Va-

somotorik, bei 0,3 Hz bei der Atmung und oberhalb von 1 Hz bei der Herztätigkeit. Der Stoffwechsel und damit die thermische Signatur von pathologischem Gewebe, z. B. Tumoren, unterscheidet sich deutlich von gesundem Gewebe. Voraussetzung für eine zuverlässige Diagnostik ist dabei allerdings neben hoher thermischer Auflösung vor allem eine gute Langzeitstabilität, um diese langsamen Regulationen zu ermitteln. Dies ist mit der von uns entwickelten IR-Kamera erstmals gelungen, diese IR-Thermografie ist in den USA bereits zugelassen. Die Vorteile des Verfahrens liegen in der fehlenden Strahlenbelastung, es kann somit wiederholt und oft angewendet werden, z. B. in der Therapieüberwachung.

Eine Serie von gekoppelten Quantenfilmen ist auch Kernstück eines weiteren „neuen“ optoelektronischen Bauelements, des Quantenkaskadenlasers (QCL = quantum cascade laser). Zwei gebundene Elektronenzustände im Potentialtopf fungieren als oberes und unteres Laserniveau, die Energiedifferenz bestimmt die Emissionswellenlänge. Diese kann auch hier durch „band structure engineering“ in weiten Bereichen variiert werden, so wurden in unterschiedlichen Materialsystemen Wellenlängen von 3 bis über 100 μm realisiert. Eine effektive Besetzungsinversion der an der Emission beteiligten Laserniveaus ist Voraussetzung für die Lasertätigkeit. Der angeregte Zustand sollte daher langlebiger sein, der untere schnell entvölkert werden, also möglichst kurzlebig. Die Wirkungsweise des QCLs wird in Abb. 2 deutlich.

Der Laser arbeitet dann effizient, wenn Elektronen das obere Laserniveau nur über das untere Laserniveau verlassen können, d. h. die Potentialbarriere muss für Elektronen im oberen Niveau undurchlässig sein. Dies erreicht man mit ei-

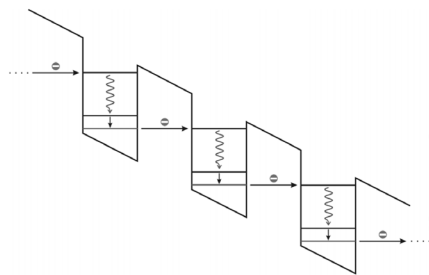


Abb. 2a: Prinzip des QCLs: Übergänge zwischen gebundenen Zuständen im Potentialtopf (Leitungsbandverlauf).

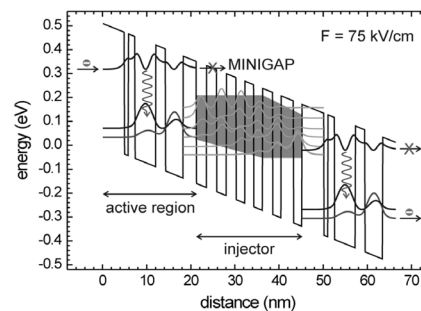


Abb. 2b: Bandstruktur des QCLs mit aktiver Zone und Injektor. Laserübergang im linken Potentialtopf (Lebensdauer des obigen Niveaus $\sim 2 - 3$ ps), Entleerung des unteren Niveaus durch Tunneln (0,2 ps) und Injektion in nächster Stufe der Kaskade.

nem Übergitter, das die Elektronen im oberen Laserniveau reflektiert. Die Periode dieses „Bragg-Gitters“ wird so eingestellt, dass die reflektierten Teilwellen konstruktiv überlagert sind. Für das untere Niveau gilt das Gegenteil – hier muss die Barriere möglichst durchlässig sein, um das untere Niveau effektiv zu entleeren. Dies geschieht durch einen resonanten Tunnelprozess in einen benachbarten Potentialtopf, wobei die Energiedifferenz gerade der Energie eines LO-Phonons entspricht – dieser resonante Prozess ist schnell. Der Materialgewinn der unipolaren QCLs ist niedriger als der konventioneller bipolarer Laser, für einen ausreichenden Materialgewinn müssen daher viele Perioden kaskadiert werden, d. h. ein Elektron durchläuft viele Quantentöpfe unter Aussendung jeweils eines Photons. Das Übergitter der Barriere muss daher noch eine weitere Funktion erfüllen, es muss als effektiver Injektor für den folgenden Potentialtopf fungieren, oder, anders ausgedrückt, es muss für die getunnelten Elektronen transparent sein (durch die Ausbildung von Minibändern). Die gesamte Struktur ist ferner so auszulegen, dass Energieniveaus und Resonanzbedingung bei angelegtem elektrischen Feld passend bzw. erfüllt sind, was alles noch etwas komplizierter macht [2].

Der QCL ist ein Musterbeispiel für die erfolgreiche Anwendung von Quantenphänomenen in neuen Bauelementen, demonstriert andererseits aber auch sehr eindeutig den hohen Anspruch an Material- und Technologieentwicklung. Es ist deshalb wahrscheinlich kein Wunder, dass mehr als 20 Jahre zwischen erstem Vorschlag des QCLs [3] und erster Realisierung [4] vergingen. Der typische QCL enthält bis zu 1000 Einzelschichten, deren Dicken dürfen in nur atomaren Dimensionen variieren.

Die QCLs sind eine neue Klasse von Lasern, durch die konsequente Ausnutzung von Quanteneffekten werden neue Wellenlängenbereiche erschlossen mit Emissionen bis über 100 μm . Im übrigen sind sie die derzeit einzigen Halbleiterlaser, die im mittleren IR bei Raumtemperatur betrieben werden können. Sie werden Anwendungen finden in zivilen und militärischen Feldern, so z. B. in der spektroskopischen Spurengasanalyse [2], da die Schwingungs-Rotationsübergänge vieler relevanter Gasmoleküle im mittleren IR liegen. In der medizinischen Diagnostik und Therapie und vielleicht in der Freistrahlkommunikation liegen weitere Anwendungsgebiete.

Zusammenfassung und Ausblick

Nur wenige Bereiche unserer technisierten Welt haben sich so rasant und nachhaltig verändert wie die Mikroelektronik oder Optoelektronik. Konsequente Skalierung und Erhöhung der Integrationsgrade kennzeichnen die Silicium-CMOS-Technik. Mit Heterostrukturen und reduzierter Dimensionalität der Ladungsträger sind neue Bauelemente entstanden wie QWIPs und QCLs. Auf dem Sektor der Materialforschung hat sich ein neuer III-V-Halbleiter etabliert,

das GaN, Grundlage für kurzwellige (blaue) LEDs und Laser. Hier wird einer der großen Zukunftsmärkte der Halbleiter liegen auf dem Gebiet der Lichterzeugung mit Festkörpern: Solid-state lighting oder „Leuchtdioden werden Glühlampen ersetzen“.

Literatur

- [1] SCHNEIDER, H., M. WALTHER, C. SCHÖNBEIN, R. REHM, J. FLEISSNER, W. PLETSCHEN, J. BRAUNSTEIN, P. KOIDL, G. WEIMANN, J. ZIEGLER & W. CABANSKI: QWIP FPAs for high-performance thermal imaging. *Physica E* **7**, 101 (2000).
- [2] MANN, C.: Entwurf und Charakterisierung von Quantenkaskadenlasern. Dissertation, Univ. Freiburg, ISBN 3-89820-758-7, (2004).
- [3] KAZARINOV, R. F. & R. F. SURIS: Electric and electromagnetic properties of semiconductors with a superlattice. *Sov. Phys. Semicond.* **6** (1), 120 – 131 (1972).
- [4] FAIST, J., F. CAPASSO, D. L. SIVCO, C. SIRTORI, F. A. HUTCHINSON & F. CHO: Quantum cascade laser. *Science* **264**, 533 – 556 (1994).